

## キャビテーション壊食 (15)

## — XII 高分子材料のキャビテーション壊食 —

岡田 庸敬\*・服部 修次\*\*

## 1. 材料の機械的性質との関係

高分子材料や高分子被覆材料の耐キャビテーション壊食性に関する初期の研究は、1958年から1961年にかけて Lichtman らによって U.S. Naval Applied Science Laboratory で行なわれた<sup>1-3)</sup>。表1は彼らが回転円板法で実験を行なった金属材料、高分子材料、被覆材料の耐壊食性の序列を示している。ナイロン、ポリシリケートガラス、ネオプレンはステライト 6B 程度、塩化ビニールは S30C 炭素鋼程度、スチレン-アクリルニトリルは純アルミニウム程度の耐壊食性を示している。

表1 材料の耐キャビテーション壊食性の序列

序列	体積減少率, $\mu\text{l/h}$	材料		
		金属	プラスチック	被覆材
1	0~0.2	ステライト 6B	ナイロン (モールド材)	高密度ポリシリケートガラス、1オロシリケートガラス、Ni-Cr合金(溶射、肉盛り)、液体ネオプレン、ポリウレタン(鋳造)、ネオプレン(圧着)
2	0.2~0.4	モネルCRA、Mn-Ni青銅		
3	0.4~0.6	モネルCRS、304ステンレス鋼、Ni-Al青銅		
4	0.6~0.8	Mn青銅		
5	0.8~1.0	モネル、市販青銅		
6	1.0以上	S30C炭素鋼	PVC	Al-チタニア溶射材
		アルミニウム A1100-O	スチレン-アクリロニトリル	Al-アルミナ溶射材、青銅-Ni溶射材、不溶融ポリサルファイド(コーキング型)、ポリサルファイド(溶射材)、ポリシロクサン(室温硬化)、エポキシエナメル、エポキシ(ペースト)、チフロンシート、ナイロン(フッ化処理材)、シリケート、高密度亜鉛

塩化ビニールの破断伸びは 60 % 程度であるのに対して、ナイロンは 300 % 近くまで伸びるので、高分子材料の耐壊食性は破断伸びが大きいほど優れる傾向にあるとしている。

Hammit らは<sup>4)</sup>は、天然ゴム、ネオプレン、エスタン、Epon-828、プレキシガラスを磁歪振動装置の対向二面方式でキャビテーション壊食試験を行ない、単位時間当たりの平均壊食深さ MDPR を材料のショア硬さで整理した。図1に示すように硬い Epon-828 やプレキシガラスは MDPR が大きく、逆に軟らかい天然ゴムやネオプレンの耐壊食性が優れた結果を得ている。ネオプレン 1~

3はこの順にショア硬さが低くなっており、ネオプレン 4 は伸びを大きくした材料である。MDPR は引張強さで整理するとあまりよい関係が選られないが、ショア硬さではよい相関性があるとしている。

Barletta と Ball<sup>5)</sup> は、金探鉱産業の効率化を目指して開発した高含水を使用した新しい流体機械がキャビテーション壊食を生じたので、代替部材用にふさわしい 26 種類の高分子材料や高分子基複合材料を選び、これらの材料の耐壊食性を系統的に検討した。材料の破断伸びで整理すると、破断伸びが広範囲に変化しても壊食抵抗はあまり変わらない。逆に破断伸びが同じでも

壊食抵抗が大きく変化して、壊食抵抗との明瞭な関連性は得られない。図2はショア硬さと5時間後の体積減少量との関係である。ポリプロピレン

\* 元 福井大学 工学部 機械工学科 (Tsunenori Okada)

\*\* 福井大学 工学部 機械工学科 (Shuji Hattori)

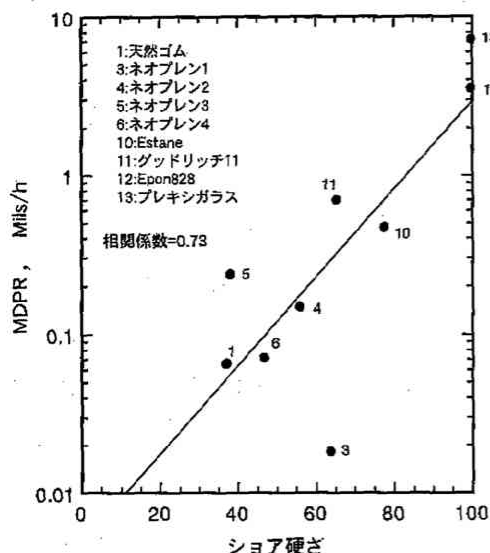


図1 ショア硬さと平均壊食深さ率 (MDPR) との関係  
(1 mil = 25  $\mu$ m)

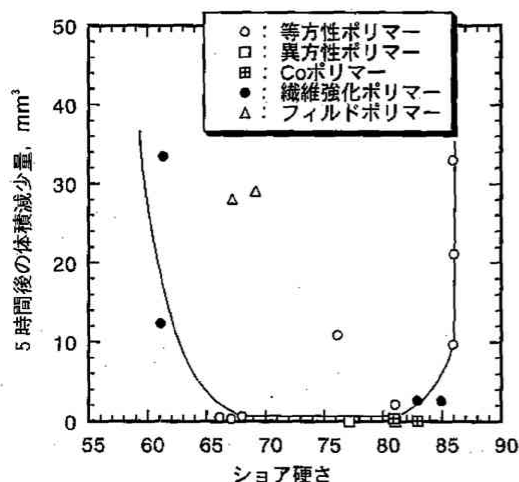
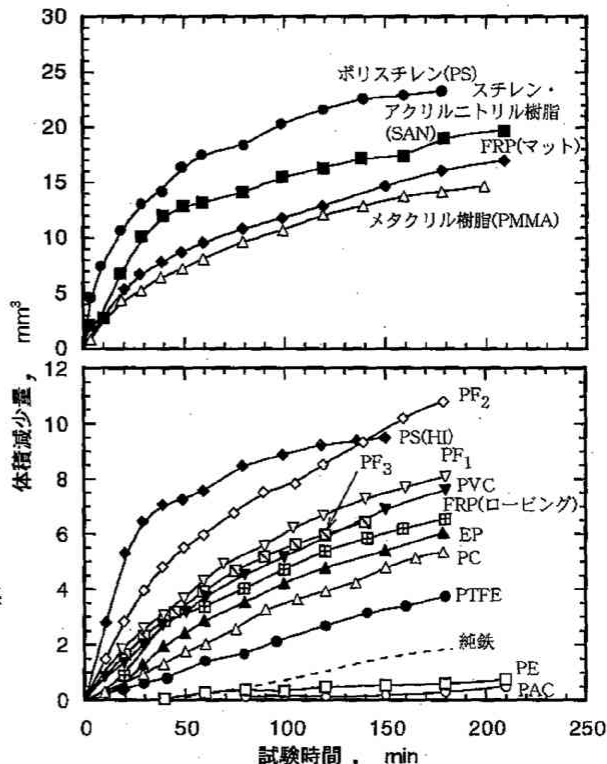


図2 ショア硬さと5時間後の体積減少量との関係

と PTFE の結果を除けば、体積減少量はショア硬さの増加に対して U 字形に変化する。ショア硬さが 82 以上になると材料はキャビテーション気泡崩壊圧によって脆性破壊し、ショア硬さが 66~85 では延性破壊するために壊食量は小さく、それ以下では硬さ不足のために再び壊食量は増加する。高分子材料では破壊形態が壊食に大きく影響する。

北條と津田は<sup>6)</sup>は、熱可塑性樹脂 9 種類、熱硬

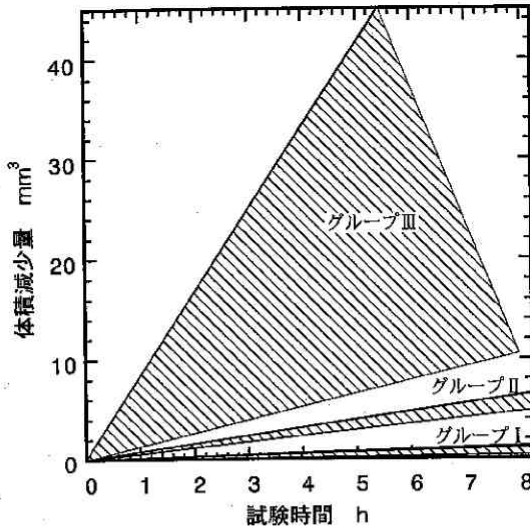


(PF<sub>1</sub>: フェノール樹脂 (パルプ), PF<sub>2</sub> 2: 同 (アスベスト), PF<sub>3</sub>: 同 (セロシン), PVC: 硬質塩化ビニル樹脂, EP: エポキシ樹脂, PC: ポリカーボネート樹脂, PTFE: 四ふっ化エチレン樹脂, PE: ポリエチレン, PAC: ポリアセタール)

図3 種々の高分子材料の体積減少量曲線

化性樹脂 1 種類、複合材料 5 種類の高分子材料のキャビテーション壊食試験を行ない、体積減少量曲線を求めた。図3はその結果で、ポリスチレンなどの脆性材料の損傷量は大きく、延性材料で結晶性的高分子材料は損傷量が少ない。特に、結晶化度の大きいポリエチレンやポリアセタールは純鉄よりも優れた耐壊食性を示している。壊食の様子をもとに延性、中間、脆性的破壊のグループに分けて体積減少量曲線を分類すると図4のようになる<sup>5)</sup>。

Hammitt ら<sup>4)</sup>は高分子材料のキャビテーション壊食試験と同時に液滴試験を行ない、液滴による耐壊食性は軟らかい天然ゴムが最も悪く、キャビテーション壊食試験の場合と全く逆の傾向になる。この原因はキャビテーション気泡が崩壊する際に、固体表面の弾性係数に大きく影響されるた



グループ	高分子材料名	体積減少量 mm <sup>3</sup>		ショア硬さ
		5時間	7時間	
グループI (延性破壊)	High density polyethylene	1.06	1.35	68
	Polyamide 66+Glass fiber	1.09	-	83
	UHMWPE	0.85	0.96	66
	Polyamide 66 + Polyethylene	0.09	0.36	78
	Polyacetal + Polyethylene	0.24	0.90	81
	Double sintered ultra high molecular weight polyene UHMWPE	0.53	0.70	66
グループII (中間破壊)	Polyacetal polyacetal	0.64	0.92	81
	Polyacetal + Glass fiber	3.14	5.35	66
	Poly acetal	2.79	4.07	69
	Polyacetal + Polyethylene + Glass fiber	3.01	4.93	83
グループIII (脆性破壊)	Poly (amide + imide)	10.07	13.31	86
	Polypropylene	11.20	-	76
	Polysulfon	21.53	-	86
	Polyethylene + Terephthalate	35.57	-	86

図4 延性、中間、脆性破壊を示す高分子グループ I, II, III の体積減少量の範囲

めである。このことは、高分子材料のキャビテーション壊食では材料の強度特性と同時に気泡崩壊圧の変化も考慮して検討する必要性のあることを示唆している。

## 2. 音響インピーダンスを考慮した高分子材料の耐壊食性

本稿の「キャビテーション壊食(8)」でも述べた<sup>7)</sup>ように、気泡崩壊圧のジェット流も含めて水流あるいは水滴が固体壁面に衝突するとき発生する圧力  $p$  は

$$p = \frac{v}{1/(\rho_1 C_1) + 1/(\rho_2 C_2)} \quad (1)$$

で得られる。 $\rho_1$ ,  $\rho_2$  は液体および固体の密度,  $C_1$ ,  $C_2$  は液体および固体の音速である。 $\rho C$  は音響インピーダンスと呼ばれる量で、金属の音響インピーダンスは液体の音響インピーダンスに比べて1桁以上大きいので、圧力  $p$  は液体の種類によって決まることになるが、高分子材料の音響インピーダンスは液体(例えば水)と同程度である。音響インピーダンスが小さい材料ほど試験片表面に生じる圧力が小さくなることを示している。

表2は、筆者らの研究室で行なった<sup>8)</sup>壊食試験に用いた4種類の高分子材料、2種類の金属材料の密度、縦弾性係数、音響インピーダンス、熱伝導率、ガラス転移点、融点、ビッカース硬さを示したものである。参考のために水の音響インピー

表2 供試材料の物理的・機械的性質

			密度, kg/m <sup>3</sup>	縦弾性 率, GPa	音響イン ピーダ ンス, Ns/m <sup>3</sup>	ガラ ス転 移点, °C	融点 °C	熱伝導 率, W/(m·°C)	ビッ カー ス硬 さ H <sub>V</sub>
熱硬化性 樹脂	エポキシ樹 脂	EP	1.22x10 <sup>3</sup>	1.54	1.34x10 <sup>6</sup>	140	-	0.78	21
	ポリプロピ レン	PP	0.91	1.17	1.01	-10	176	0.18	8
熱可塑性 樹脂	高密度ポリ エチレン	HDPE	0.95	0.87	0.89	-120	137	0.49	4
	ポリアミド 6・6	PA66	1.14	0.60	0.81	47	267	0.25	1
Al			2.71	61.7	13.9	-	660	221.9	35
SS400			7.87	206	40.3	-	1480	55.8	113
水			1.00	2.25	1.47	-			

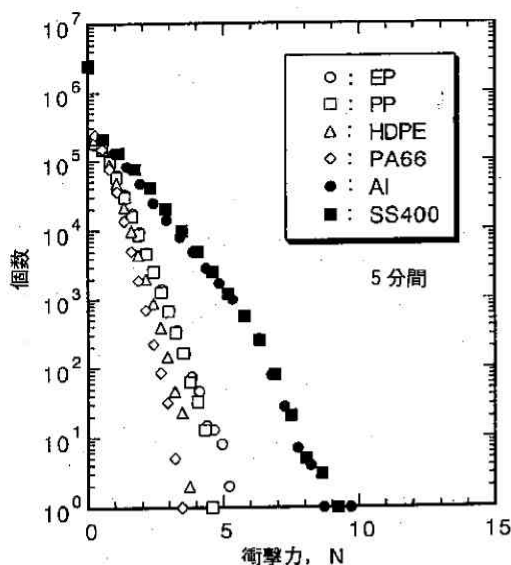
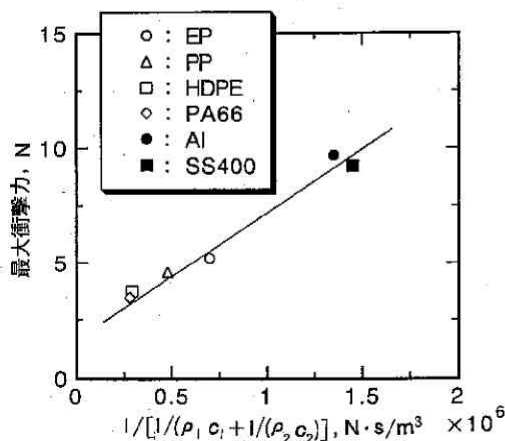


図5 衝撃力の頻度分布曲線

ダンスも示すが、高分子材料の音響インピーダンスは水よりも小さく、軟質材料のポリアミド6・6が最も小さい。また、熱伝導率が小さい材料を使用するとキャビテーション気泡崩壊圧による熱が内部に蓄積して温度上昇し、融点近くになると強度特性が悪くなるので、表中には熱伝導率、融点の値も示してある。

高分子材料の表面に作用する気泡崩壊圧を「キャビテーション壊食(7)」で述べた<sup>9)</sup> 圧力センサ


図6  $1/[1/(\rho_1 C_1) + 1/(\rho_2 C_2)]$  と最大衝撃力との関係

の上に瞬間接着剤で試験片を貼付して、磁歪振動装置で生じる衝撃力を5分間にわたって測定した。図5はその結果で、衝撃力の発生頻度は、AlやSS400のような金属材料ではほとんど変わらないが、高分子材料の最大衝撃力や発生個数は材料によって大きく変化し、金属材料に比べて著しく小さくなる。式(1)の右辺の  $1/[1/(\rho_1 C_1) + 1/(\rho_2 C_2)]$  の値と最大衝撃力の関係を図6に示す。ただし、高分子材料は金属材料に比べて熱伝導率が小さいために、キャビテーション壊食試験中に20~30℃上昇するので、この温度での縦弾性係数を用いて計算した  $1/[1/(\rho_1 C_1) + 1/(\rho_2 C_2)]$  と最大衝撃力との関係は1本の直線で表示することができ、高分子材料の表面に生じる衝撃力の大きさは液体と固体の音響インピーダンスに大きく影響されることがわかる。この研究では試験液にイオン交換水を用いているので、液体の音響インピーダンスは一定で、材料表面に作用する気泡崩壊エネルギーは主に材料側の音響インピーダンスによって決定されることになる。

図7は材料の音響インピーダンスと衝撃力の頻度分布から求めた衝撃エネルギー  $\sum F_i^2$  ( $F_i$  は個々の衝撃力)を示す。AlやSS400の金属材料のように音響インピーダンスの大きな材料では衝撃エネルギーが作用するが、高分子材料のように音響インピーダンスの小さい材料では材料表面に

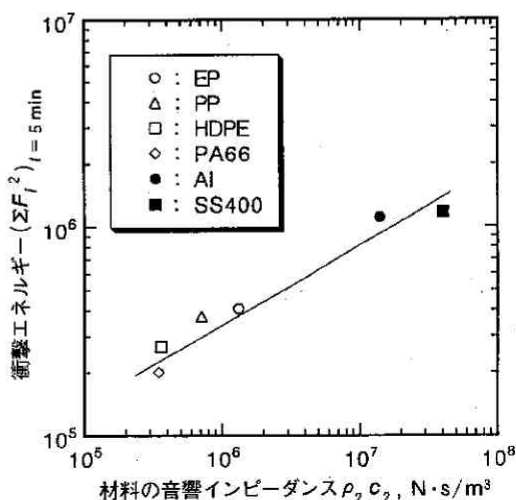


図7 材料の音響インピーダンスと衝撃エネルギーとの関係

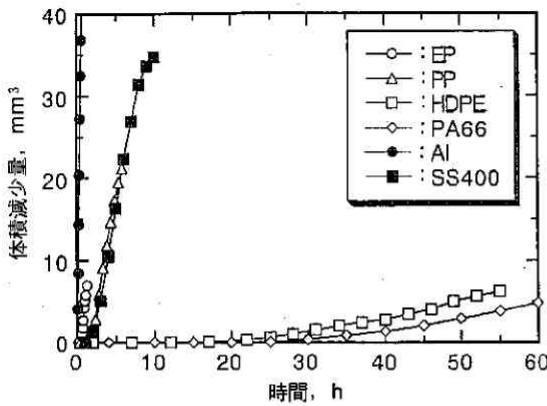


図8 体積減少量曲線

作用する衝撃エネルギーも小さい。

図8はこれらの材料の体積減少量曲線である。この材料もこれまで報告されている多くの実験結果と同様に壊食量のわずかな一定の潜伏期間を経た後、壊食量が直線的に増加する定常期に至る過程がみられる。定常期の直線の傾きから体積減少率を求めると、PA66は約1/30で一般の鉄鋼材料よりも硬さが著しく低いにもかかわらず耐壊食性は非常に優れている。

### 3. 衝撃エネルギーと壊食量

高分子材料の耐壊食性を衝撃エネルギーを用いて定量的に評価するためには、単位体積壊食させるのに必要な衝撃エネルギーを求める必要がある。壊食抵抗は破壊までに要するひずみエネルギー

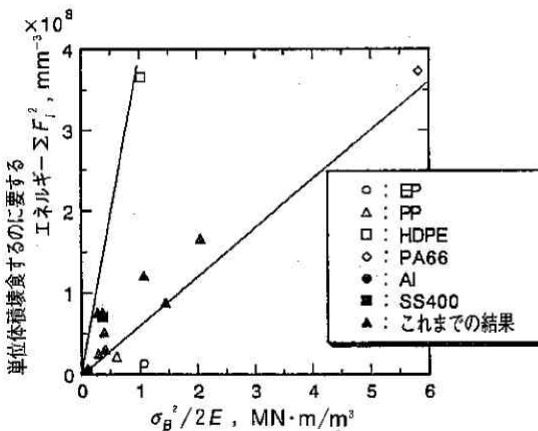
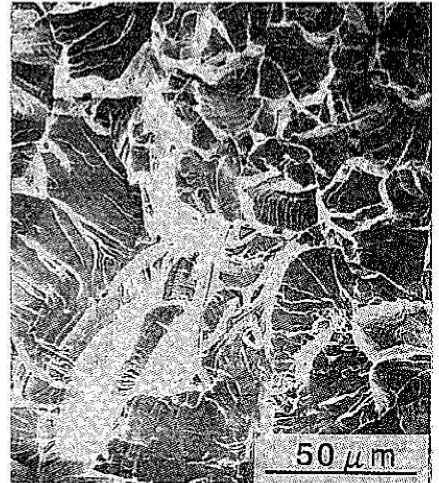


図9  $\sigma_B^2/2E$ と単位体積壊食するのに要するエネルギーとの関係

ギー Ultimate Resilience ( $=\sigma_B^2/2E$ ) とよい相関関係にあると報告されているので、 $\sigma_B^2/2E$ と、単位体積壊食するのに必要な衝撃エネルギーとの関係を図9に示す。図中には金属材料の結果も併せて示してある。高分子材料は金属材料以上にデータのちらばりが大きく、静的な強度パラメータではうまく評価できない。

高分子材料の壊食の様子を走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した結果を図10に示す。図(a)はEPの70分後の壊食面で、貝殻状の模様が多数観察される。EPの壊食の進展は表面の研磨



(a) EP (試験開始70分後)



(b) PA66 (試験開始60時間後)

図10 定常期の壊食面

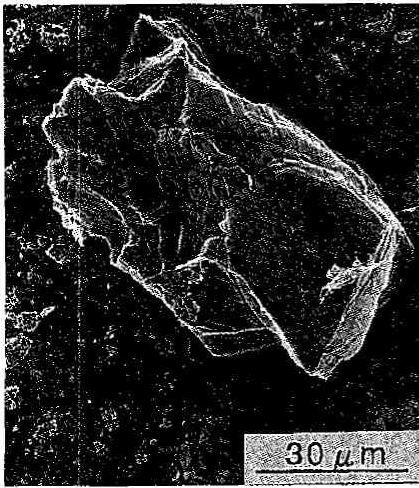


図 11 定常期に生じた脱落粉 (EP, 試験開始 70 分後)

痕に沿ってクレイズが発生し、そのクレイズに沿ってき裂が発生、進展して粒子の脱落が生じる過程が観察される。図 (b) は PA 66 の壊食面で、表面には繊維状にむしりとられたような延性的な破壊の様相を呈している。またき裂も多数観察される。脱落粉が混在した試験液を  $0.1 \mu\text{m}$  の最大透過径をもつ多孔質高分子フィルタでろ過して採取した脱落粉を SEM で観察すると、壊食の初期では  $2 \sim 4 \mu\text{m}$  程度の小さい脱落粉しか観察されないが、定常期では、図 11 に示すように凹凸が激しい  $30 \sim 40 \mu\text{m}$  の大きなものが観察される。体積減少量曲線に潜伏期が存在すること、壊食面や

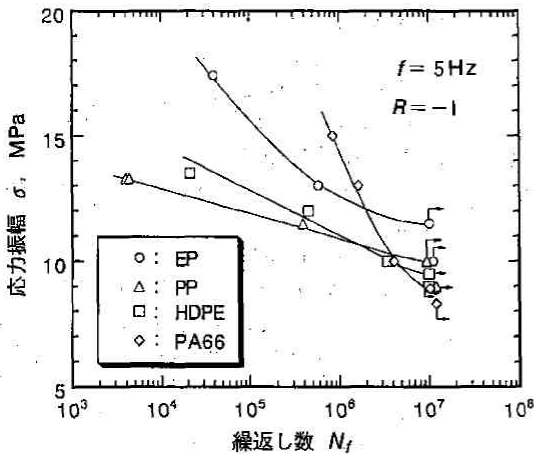


図 12 S-N 曲線

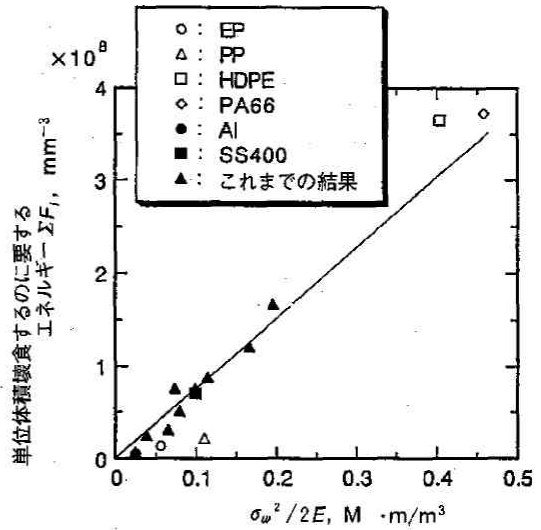


図 13  $\sigma_w^2/2E$  と単位体積壊食するのに要するエネルギーとの関係

脱落粉に貝殻状の模様やき裂が多数観察されること、定常期では大きな壊食粉が形成されることなどを総合すると、高分子材料の壊食も疲労破壊的に進行するものと考えられる。

供試材料の疲労強度を得るために、同一材料で試験片を作成して引張・圧縮疲労試験を行なった。図 12 はこの結果を示したもので、EP, PP, PA 66 では S-N 曲線の勾配は急である。高分子材料の結果は金属材料と異なり、繰返し数が  $10^6 \sim 10^7$  回でも水平とならず徐々に低下しているが、各材料の  $10^7$  時間強度を  $\sigma_w$  として求めた。疲労強度  $\sigma_w$  を用いて疲労破壊に要するひずみエネルギー相当量  $\sigma_w^2/2E$  を算出し、図 9 に示した定常期に単位体積壊食させるのに要する衝撃エネルギーを整理し直すと図 13 のようになる。高分子材料は金属材料を含めて原点を通る 1 本の直線で示すことができ、材料表面に作用する衝撃エネルギーを考慮すれば壊食抵抗は疲労強度を用いて金属材料と同様にうまく整理できる。

#### 4. おわりに

高分子材料の耐壊食性を評価する場合には、材料の強度特性とともに、材料の音響インピーダンスが大きく影響する。また、キャビテーション気泡の崩壊が激しい場合には材料内部の温度が上昇



して材料の強度が低下したり、被覆材料として用いる場合には母材との密着性<sup>10)</sup>が問題になるので、高分子材料はキャビテーション気泡の崩壊が弱いときだけ効果的なようである。さらに、高分子材料は経年劣化して強度が著しく低下するので、長年にわたって使用する場合は注意が必要である。

#### 参考文献

- 1) J.K. Lichtman and J.Z. Kallas : Trans., ASME, **80**, 6 (1958) p.1325.
- 2) J.K. Lichtman, D.H. Kallas, C.K. Chatten and CDR. E.P. Cochran, Jr. : Corrosion, **17**, 10 (1961) p.119.

- 3) J.Z. Lichtman and D.H. Kallas : Materials Protection, **4**, 40 (1967) p.40.
- 4) F.G. Hammitt, E.E. Timm, J.B. Hwang and T.C. Huang : ASTM STP 567 (1974) p.197.
- 5) A. Jarketta and A. Ball : Proc.6 Int. on Erosion by Liquid and Solic Impact (1983) p.1-1.
- 6) 北條英光・津田 健：潤滑, **30**, 4 (1985) p.233.
- 7) 岡田庸敬・服部修次：機械の研究, **50**, 4 (1998) p.501.
- 8) 森 啓之・服部修次・岡田庸敬：第23回疲労シンポジウム講演論文集 (1996) p.34.
- 9) 岡田庸敬・服部修次：機械の研究, **50**, 3 (1998) p.406.
- 10) M.I. Topchiashvili and M.I. Topchiachvily : IAHR/AIRH Symposium 1970 Stockholm (1970) p.H5.

(第XII回終わり、以下次号)

## 海外ニュース

### 個性的なCD制作のための完全ツール カラープリンタ

フランスのイメディア・テクノロジー社は、CDのための第2世代プリンタ「CD STYLE 600™」と「CD STYLE 400™」を開発した。

このユニークなツールには2重機能が統合されており、ユーザーは、CDの印刷面に直接印刷して個性的なCDを製作することができるだけでなく、CDのジャケットや付属資料にも印刷することができる。申し分のない仕上がりで、製品の価値を高める。試し刷りはCDに印刷する前に紙で行なうので、経済的で簡単。

本機は、従来型のプリンタと同様の紙送りシステムにより、「1枚ずつ」用紙を送り込む機能を備えている。CDの装填はキャディーを使用して行なう。同社が開発したACP™ (Advanced CD Positioning) システムが印刷の位置決めおよびセンタリングを自動的に行なう。CDの連続印刷は、「押ボタン」機能によってプリンタで直接制御する。

メーカーを問わず、大多数の印刷可能CDに対応し、市販されている大半のグラフィック・ソフトウェア (CorelDraw, Photoshop, Illustrator, Xpress 向けに販売されているマスク) と互換性がある。また、ドライバ

は、最大限の互換性が得られるよう最適化されている。  
※ CD STYLE 600™

互換性：Mac, Windows 3.1, 95, NT, DOS

解像度：1440 × 720 dpi

パラレルポート：PC 接続

シリアルポート：Mac 接続

速度：6 頁 / 分 (モノクロ), 4 頁 / 分 (カラー)

※ CD STYLE 400™

互換性：Windows 3.1, 95, NT, DOS

解像度：720 × 720 dpi

パラレルポート：PC 接続

速度：4 頁 / 分 (モノクロ), 3 頁 / 分 (カラー)

会社名：IMEDIA TECHNOLOGIES

所在地：1 / 7, rue Henri de France 95870 BEZONS  
FRANCE

TEL : (33-1) 34-34-37-77

FAX : (33-1) 34-34-37-70

(フランス大使館産業技術広報センター提供)

(TEL 03-3435-7455, FAX 03-3435-7457)